

Comparativa del efecto de la aplicación de las acciones de Eurocódigo con las de la antigua norma IAP-98 sobre puentes mixtos de carretera de anchura reducida

Comparison of the effect of the application of Eurocode actions with those of the old IAP-98 standard on composite road bridges of reduced width

Antonio Carnerero Ruiz

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Prointec S.A., E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid

RESUMEN

Las acciones de tráfico definidas en Eurocódigo, similares a las contenidas en la actual instrucción de acciones española para puentes de carretera, IAP-11, ha supuesto un cambio significativo respecto a las definidas en la antigua norma española, IAP-98. Del análisis de estas acciones, se comprueba que su efecto es especialmente importante en el caso de puentes de anchura reducida. En el presente trabajo se realiza una revisión de su efecto específico en el caso de puentes mixtos, y en concreto, sobre su repercusión en los principales estados límites que condicionan el diseño de los elementos que forman estos puentes.

ABSTRACT

The traffic actions defined in Eurocode, similar to those contained in the current Spanish actions standard for road bridges, IAP-11, has meant a significant change with respect to those defined in the old Spanish standard, IAP-98. The analysis of these actions shows that their effect is especially important in the case of bridges of reduced width. In the present work, a review of its specific effect in the case of composite bridges is carried out, and in particular, on its impact on the main limit states that condition the design of the elements that form these bridges.

PALABRAS CLAVE: puente mixto, acciones, Eurocódigo, IAP-98, anchura reducida.

KEYWORDS: composite bridge, actions, Eurocode, IAP-98, reduced width.

1. Introducción

La presente comunicación surge a partir de la experiencia vivida durante el diseño de un puente mixto en sección cajón proyectado a finales del año 2018 dentro del desarrollo del proyecto de adecuación del Nudo Norte de Calle 30 para el Ayuntamiento de Madrid. Se trata de un puente mixto de 206 m de longitud

y 7.3 m de anchura, formado por cuatro vanos de 36+62+68+40 m, y sección cajón unicelular de canto variable. Los resultados obtenidos en su dimensionamiento, siguiendo los criterios recogidos en los Eurocódigos, se alejaban en muchos casos de los que habitualmente se venían obteniendo en puentes similares con la

aplicación de la ya derogada norma de acciones IAP-98 [1], generando incrementos en la mayoría de los elementos que componen la estructura.

Y es que la entrada en vigor de la norma de acciones en puentes de carretera del Ministerio de Fomento, IAP-11 [2], y la posterior obligatoriedad del empleo de los Eurocódigos [3] [4] para los proyectos dependientes de la Dirección General de Carreteras, ha supuesto un cambio importante en el proyecto de puentes.

Estos cambios se traducen especialmente en el valor y forma de aplicación de las sobrecargas móviles. Como es bien conocido, de un único carro de 600 kN para puentes con plataforma de anchura inferior a 12 m, colocado en cualquier posición, y una sobrecarga uniforme de 4 kN/m² extendida a toda o parte de la superficie de la calzada, se ha pasado a una aplicación de las cargas en carriles virtuales. En cada carril, hasta un máximo de tres, puede actuar un vehículo pesado de dos ejes de valor

600 kN, 400 kN y 200 kN, respectivamente. La sobrecarga uniforme también se modifica, pasando a ser de 9 kN/m² en el primer carril virtual y de 2.5 kN/m² en el resto.

Si se comparan los valores de los esfuerzos solicitantes generados con la normativa actual y con la antigua se pueden encontrar importantes incrementos, incrementos que se acentúan especialmente en el caso de puentes de anchura reducida, inferiores a 8 m, como los que se encuentran en la mayoría de los ramales en nudos de enlaces de carreteras de alta capacidad.

Su efecto en el diseño de puentes mixtos conduce a aumentos en la cuantía de acero, e incluso a modificaciones en los detalles constructivos de estos puentes que conviene tener en cuenta.

En la presente ponencia se tratará de cuantificar el efecto que la normativa actual tiene en el diseño de estos puentes comparada con la antigua norma y se destacarán los cambios en el diseño que resultan más significativos.

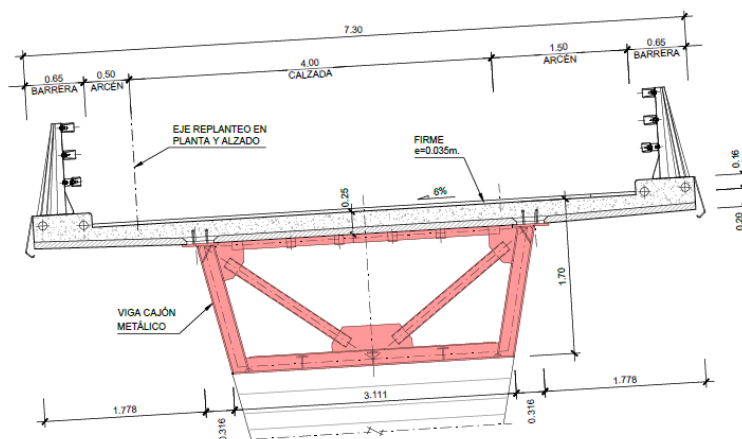


Figura 1. Sección transversal tipo del futuro puente en el Nudo Norte de la Calle 30, Madrid.

2. Planteamiento

Para llevar a cabo el análisis propuesto se han estudiado una serie de 10 puentes mixtos en sección cajón de luces máximas variables entre 30 y 70 m. Se ha escogido un modelo de puente tipo de tres vanos simétrico con las luces de los

vanos laterales un 80% la luz del vano central. En todos los casos la plataforma del puente se ha mantenido con una anchura constante de 7.3 m, distribuida en dos bandas de 0.65 m en los laterales para la colocación de los pretilos de seguridad y una calzada central de 6 m, lo que conduce, a efectos de aplicación de la carga, a tener dos carriles virtuales de 3 m de anchura.

Los primeros cinco puentes se han definido con canto constante y esbeltez $L/25$, mientras que en los cinco restantes se ha empleado canto variable con esbeltez $L/20$ en las secciones sobre pilas y $L/40$ en los centros de vano y en las secciones extremas de los vanos laterales, relaciones en todos los casos habituales para esta tipología. Para poder facilitar la comparación entre los distintos modelos de puente se ha preferido mantener constante el ancho de la platabanda inferior de la sección cajón metálica con un valor igual a 3.175 m, haciendo variable la inclinación de las almas. En

todos los casos se ha empleado doble acción mixta en las zonas cercanas a pilas con espesor variable del hormigón de la losa inferior de 0.20 m a 0.4 m.

Toda la anchura del puente se cubre mediante una losa superior de hormigón armado con voladizos laterales de 1.75 m de longitud y 0.25 m de espesor en su apoyo en la sección metálica, similar a la mostrada en la figura 1.

En las tablas siguientes se resumen los datos principales de los puentes analizados.

Tabla 1. Características principales de los puentes de canto constante estudiados

| Nº | Puentes | Longitud | Canto total(m) | Canto metal(m) | Canto losa(m) | Espesor hormigón fondo |
|----|----------|----------|----------------|----------------|---------------|------------------------|
| 1 | 24+30+24 | 78 | 1.2 | 0.95 | 0.25 | 0.20 |
| 2 | 32+40+32 | 104 | 1.6 | 1.35 | 0.25 | 0.25 |
| 3 | 40+50+40 | 130 | 2 | 1.75 | 0.25 | 0.30 |
| 4 | 48+60+48 | 156 | 2.4 | 2.15 | 0.25 | 0.35 |
| 5 | 56+70+56 | 182 | 2.8 | 2.55 | 0.25 | 0.40 |

Tabla 2. Características principales de los puentes de canto variable estudiados

| Nº | Puentes | Longitud | Canto total Pila(m) | Canto total CV(m) | Canto metal Pila(m) | Canto metal CV(m) | Canto losa(m) | Espesor HF(m) |
|----|----------|----------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------|---------------|
| 1 | 24+30+24 | 78 | 1.5 | 0.75 | 1.25 | 0.5 | 0.25 | 0.20 |
| 2 | 32+40+32 | 104 | 2.0 | 1.0 | 1.75 | 0.75 | 0.25 | 0.25 |
| 3 | 40+50+40 | 130 | 2.5 | 1.25 | 2.25 | 1.0 | 0.25 | 0.30 |
| 4 | 48+60+48 | 156 | 3.0 | 1.5 | 2.75 | 1.25 | 0.25 | 0.35 |
| 5 | 56+70+56 | 182 | 3.5 | 1.75 | 3.25 | 1.5 | 0.25 | 0.40 |

Cada uno de los 10 puentes ha sido dimensionado primero con las acciones correspondientes a la antigua norma IAP-98 y, posteriormente, con las acciones del Eurocódigo, estas últimas, similares a las de la actual norma de acciones española, IAP-11, e idénticas en cuanto a las sobrecargas de tráfico se refiere. Dado que la acción dominante de cara al dimensionamiento es esta última, el resultado del dimensionamiento con Eurocódigo o con IAP-11 se considerará el mismo. Se obtienen, por tanto, 20 puentes de los cuales se han definido los espesores de las chapas a lo largo del tablero necesarios para

verificar los estados límites últimos y en servicio. El proceso se ha realizado con la ayuda de un programa de cálculo de desarrollo propio con herramientas específicas para el dimensionamiento de puentes mixtos. En los próximos apartados se realizará una comparación de los resultados obtenidos, primero en esfuerzos y, posteriormente, de los estados límite principales.

3. Acciones y esfuerzos

3.1. Variación según el ancho del tablero

Como es sabido, la definición de las sobrecargas de tráfico de los Eurocódigos depende directamente de la anchura de la plataforma, mientras que, en la anterior normativa, esta variación era mínima, limitándose a disponer un segundo vehículo pesado cuando la anchura del tablero superaba los 12 m. Si comparamos la acción originada por los vehículos pesados comprobamos que en puentes con una plataforma de rodadura de anchura superior a los 5.4 m e inferior a los 9 m, ahora se disponen dos vehículos pesados de 600 kN y 400 kN frente al único vehículo pesado de 600 kN que se disponía con la normativa antigua, lo que supone un 66% más de carga. En cuanto a la sobrecarga uniforme, la carga de 4 kN/m² de la IAP-98 ha pasado en las normativas actuales a 9 kN/m² en el primer carril virtual y 2.5 kN/m² en el resto. La

variación de la carga total por unidad de longitud resulta un 44% superior en puentes con plataforma de 6 m, reduciéndose paulatinamente esta diferencia hasta igualarse en los puentes de 13 m, y ser hasta un 10% inferior en los de 18 m. (ver tabla 3). Por otra parte, en esta hipótesis de carga máxima hay que añadir un torsor concomitante que no existía con las acciones de la antigua norma. Para las hipótesis de torsor máximo también se tiene con la norma actual un torsor por unidad de longitud un 125% superior en los tableros de 6 m de plataforma, valor que disminuye lentamente hasta un 53% superior en tableros de 18 m.

Los resultados previos demuestran como en los tableros de anchura reducida el incremento de las acciones de tráfico con las normativas actuales resulta muchos más importante que en los de anchuras medias donde tienden a igualarse.

Tabla 3. Comparación de las acciones por unidad de longitud debidas a la sobrecarga uniforme de tráfico en función del ancho de la plataforma

| Ancho Calzada | IAP-98 | | EN/ IAP-11 | | P _{EN} /P _{IAP98} |
|---------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| | p _{max} (kN/m) | t _{con} (mkN/m) | p _{max} (kN/m) | t _{con} (mkN/m) | |
| 6 | 24.00 | 0 | 34.50 | 29.25 | 1.44 |
| 7 | 28.00 | 0 | 37.00 | 39.00 | 1.32 |
| 8 | 32.00 | 0 | 39.50 | 48.75 | 1.23 |
| 9 | 36.00 | 0 | 42.00 | 58.50 | 1.17 |
| 10 | 40.00 | 0 | 44.50 | 68.25 | 1.11 |
| 11 | 44.00 | 0 | 47.00 | 78.00 | 1.07 |
| 12 | 48.00 | 0 | 49.50 | 87.75 | 1.03 |
| 13 | 52.00 | 0 | 52.00 | 97.50 | 1.00 |
| 14 | 56.00 | 0 | 54.50 | 107.25 | 0.97 |
| 15 | 60.00 | 0 | 57.00 | 117.00 | 0.95 |
| 16 | 64.00 | 0 | 59.50 | 126.75 | 0.93 |
| 17 | 68.00 | 0 | 62.00 | 136.50 | 0.91 |
| 18 | 72.00 | 0 | 64.50 | 146.25 | 0.90 |

Si sumamos el efecto del vehículo pesado con el de la sobrecarga uniforme y realizamos la comparación entre normativas de los cortantes y torsos en apoyos para un tablero biapoyado

de 6 m de plataforma viaria, obtenemos el resultado mostrado en la tabla 4. Se puede apreciar como en todos los casos el incremento del esfuerzo cortante es superior al 50% con las

normativas actuales en relación a la anterior IAP, alcanzando un valor máximo de un 61% más para el tablero de luz más reducida. Hay que señalar que estas diferencias se ven reducidas en ELU, como se verá en el siguiente

apartado, cuando se aplican los coeficientes de mayoración de 1.5 para las acciones de IAP-98 frente al 1.35 del Eurocódigo o de la IAP-11.

Tabla 4. Comparación de los cortantes y torsores en apoyos debidos a la sobrecarga de tráfico en un tablero biapoyado de 6 m de plataforma

| Luz | IAP-98 | | EN/ IAP-11 | | $V_{max,EN} / V_{max,IAP98}$ | $T_{con,EN} / T_{con,IAP98}$ |
|-----|---------------|----------------|---------------|----------------|------------------------------|------------------------------|
| | $V_{max}(kN)$ | $T_{con}(mkN)$ | $V_{max}(kN)$ | $T_{con}(mkN)$ | | |
| 30 | 930.00 | 855.00 | 1497.50 | 732.75 | 1.61 | 0.86 |
| 35 | 994.29 | 861.43 | 1586.61 | 806.73 | 1.60 | 0.94 |
| 40 | 1057.50 | 866.25 | 1675.00 | 880.50 | 1.58 | 1.02 |
| 45 | 1120.00 | 870.00 | 1762.92 | 954.13 | 1.57 | 1.10 |
| 50 | 1182.00 | 873.00 | 1850.50 | 1027.65 | 1.57 | 1.18 |
| 55 | 1243.64 | 875.45 | 1937.84 | 1101.10 | 1.56 | 1.26 |
| 60 | 1305.00 | 877.50 | 2025.00 | 1174.50 | 1.55 | 1.34 |
| 65 | 1366.15 | 879.23 | 2112.02 | 1247.86 | 1.55 | 1.42 |
| 70 | 1427.14 | 880.71 | 2198.93 | 1321.18 | 1.54 | 1.50 |

3.2. Esfuerzos sobre los puentes estudiados

En las tablas 5 y 6 se muestra la relación entre los esfuerzos flectores obtenidos con las acciones de Eurocódigos y los obtenidos con IAP-98. Se comprueba como el efecto de la normativa actual es considerablemente superior al que se obtenía con la anterior, siendo este efecto superior en las secciones de centro de vano que en las de pila, donde se llega incluso a

superar el 50% de incremento en ELS en los puentes de canto variable. Por otra parte, en general, la variación con la luz es moderada, decreciendo ésta a medida que la luz crece debido a la mayor importancia relativa que toman los pesos propios respecto las sobrecargas. Por otra parte, se obtiene coeficientes ligeramente superiores en el caso de los puentes de canto variable respecto los obtenidos en los de canto constante.

Tabla 5. Relación entre los esfuerzos flectores según Eurocódigo y según IAP-98 en los puentes de canto constante.

| Puentes | M_{EN}/M_{IAP98} | | | |
|----------|--------------------|------|----------------|------|
| | Pila | | Centro de Vano | |
| | ELS | ELU | ELS | ELU |
| 24+30+24 | 1.25 | 1.21 | 1.45 | 1.37 |
| 32+40+32 | 1.22 | 1.19 | 1.42 | 1.34 |
| 40+50+40 | 1.19 | 1.16 | 1.44 | 1.37 |
| 48+60+48 | 1.20 | 1.17 | 1.43 | 1.36 |
| 56+70+56 | 1.13 | 1.11 | 1.40 | 1.33 |

Tabla 6. Relación entre los esfuerzos flectores según Eurocódigo y según IAP-98 en los puentes de canto variable.

| Puentes | M_{EN}/M_{IAP98} | | | |
|----------|--------------------|------|----------------|------|
| | Pila | | Centro de Vano | |
| | ELS | ELU | ELS | ELU |
| 24+30+24 | 1.27 | 1.23 | 1.56 | 1.45 |
| 32+40+32 | 1.21 | 1.18 | 1.58 | 1.48 |
| 40+50+40 | 1.20 | 1.17 | 1.58 | 1.48 |
| 48+60+48 | 1.19 | 1.16 | 1.57 | 1.47 |
| 56+70+56 | 1.18 | 1.14 | 1.50 | 1.41 |

En las relaciones para los esfuerzos cortantes y torsos se repite la tendencia con incrementos de cortantes medios del 33% en las secciones de estribo y del 24% en las de pila. Para los torsos este incremento es muy

superior con valores que superan en muchos casos el 40% de incremento. La variación entre los puentes de canto constante y variable es muy reducida (ver tablas 7 y 8).

Tabla 7. Relación entre los esfuerzos cortantes y torsos según Eurocódigo y según IAP-98 en los puentes de canto constante en ELU.

| Puentes | Cortantes | | Torsos | |
|----------|-----------|------|---------|------|
| | Estribo | Pila | Estribo | Pila |
| 24+30+24 | 1.37 | 1.29 | 1.28 | 1.33 |
| 32+40+32 | 1.34 | 1.26 | 1.32 | 1.42 |
| 40+50+40 | 1.33 | 1.24 | 1.42 | 1.50 |
| 48+60+48 | 1.32 | 1.22 | 1.48 | 1.58 |
| 56+70+56 | 1.30 | 1.18 | 1.55 | 1.66 |

Tabla 8. Relación entre los esfuerzos cortantes y torsos según Eurocódigo y según IAP-98 en los puentes de canto variable en ELU.

| Puentes | Cortantes | | Torsos | |
|----------|-----------|------|---------|------|
| | Estribo | Pila | Estribo | Pila |
| 24+30+24 | 1.39 | 1.30 | 1.24 | 1.30 |
| 32+40+32 | 1.38 | 1.27 | 1.27 | 1.40 |
| 40+50+40 | 1.35 | 1.24 | 1.36 | 1.49 |
| 48+60+48 | 1.36 | 1.22 | 1.42 | 1.57 |
| 56+70+56 | 1.32 | 1.19 | 1.49 | 1.64 |

4. Dimensionamiento de las chapas principales de la sección metálica en ELU y ELS

En cada uno de los puentes estudiados y para ambas normativas se ha realizado un

dimensionamiento de las chapas principales: platabandas superiores e inferiores y almas verificando que cumplen con los requerimientos normativos tanto en tensiones en ELS como en ELU de agotamiento frente a tensiones normales y tangenciales. Como cabía esperar, en general, en el paso del puente calculado con la IAP-98 a la actual resulta

necesario incrementar la mayoría de las chapas que conforman la sección, salvo que estas presentasen inicialmente margen suficiente para hacer frente a los incrementos de esfuerzos. Es, por ejemplo, el caso de la platabanda superior en los puentes de canto variable en la sección sobre pilas. En la tabla 9 se muestra las dimensiones de esta chapa para cada uno de los puentes y para las dos normativas. Se comprueba como las secciones dimensionadas con IAP-98 son insuficientes para resistir los mayores esfuerzos generados con la normativa actual.

Tabla 9. Dimensiones de la platabanda superior en las secciones de pila en los puentes de canto variable.

| Puentes | Platabanda superior (mm) | |
|----------|--------------------------|-------------|
| | IAP-98 | EN / IAP-11 |
| 24+30+24 | 300 x 35 | 400 x 35 |
| 32+40+32 | 400 x 35 | 500 x 35 |
| 40+50+40 | 500 x 30 | 500 x 40 |
| 48+60+48 | 500 x 40 | 600 x 35 |
| 56+70+56 | 600 x 35 | 700 x 40 |

Lo mismo nos ocurre si comparamos los espesores de las almas. En el mismo caso de los puentes anteriores de canto variable, nos encontramos con los resultados que se muestran en las tablas 10 y 11. Cuando las almas presentan margen suficiente es posible mantener el mismo espesor en ambos casos. No obstante, cuando el cálculo está más afinado no resulta posible y es necesario incrementar los espesores con la normativa actual.

Tabla 10. Espesores de las almas en las secciones de pila en los puentes de canto variable.

| Puentes | Espesor de alma en pila (mm) | |
|----------|------------------------------|-------------|
| | IAP-98 | EN / IAP-11 |
| 24+30+24 | 12 | 12 |
| 32+40+32 | 15 | 15 |
| 40+50+40 | 15 | 15 |
| 48+60+48 | 15 | 20 |
| 56+70+56 | 15 | 20 |

Tabla 11. Espesores de las almas en las secciones de estribo en los puentes de canto variable.

| Puentes | Espesor de alma en estribo (mm) | |
|----------|---------------------------------|-------------|
| | IAP-98 | EN / IAP-11 |
| 24+30+24 | 12 | 15 |
| 32+40+32 | 12 | 12 |
| 40+50+40 | 12 | 15 |
| 48+60+48 | 12 | 15 |
| 56+70+56 | 12 | 15 |

En general, las cuantías de acero de las chapas principales, sin incluir arriostramientos, rigidización y mamparos, para cada uno de los puentes es la que se muestra en la tabla 12 y 13 para los puentes de canto constante y variable respectivamente.

Tabla 12. Cuantías de acero estructural de las chapas principales en los puentes de canto constante.

| Puentes | Cuantías (kg/m ²) | |
|----------|-------------------------------|-------------|
| | IAP-98 | EN / IAP-11 |
| 24+30+24 | 79.2 | 82.8 |
| 32+40+32 | 97.7 | 101.0 |
| 40+50+40 | 113.6 | 128.6 |
| 48+60+48 | 127.9 | 152.9 |
| 56+70+56 | 131.4 | 162.8 |

Tabla 13. Cuantías de acero estructural de las chapas principales en los puentes de canto variable.

| Puentes | Cuantías (kg/m ²) | |
|----------|-------------------------------|-------------|
| | IAP-98 | EN / IAP-11 |
| 24+30+24 | 79.2 | 87.1 |
| 32+40+32 | 93.6 | 101.2 |
| 40+50+40 | 104.7 | 117.9 |
| 48+60+48 | 118.6 | 152.0 |
| 56+70+56 | 143.7 | 160.9 |

Se obtienen, en general, incrementos significativos en las cuantías de los puentes dimensionados con la normativa actual, especialmente en las luces superiores donde la mayoría de las chapas de los cajones metálicos se encuentra más ajustada a los esfuerzos solicitantes y cualquier incremento obliga a su modificación.

El contraste de cuantías entre los puentes de canto constante y de canto variable no aporta

una referencia válida al haber sido dimensionados con esbelteces no comparables. Se puede concluir que, sin duda, los puentes de anchor reducido conllevan en la actualidad un coste de acero superior al que se tenía con anterioridad que se puede estimar entre un 10% y un 20%, mayor a medida que crece la luz principal.

5. Conexión

El incremento de los esfuerzos generados por la aplicación de las normativas actuales, tanto en flectores como en cortantes, conlleva un aumento proporcional en la disposición de la conexión con aumentos que oscilan alrededor del 25%. Como ejemplo, en el caso de la zona de estribo del puente de vano lateral de 40 m, se obtiene una cuantía de 9 pernos por metro con la normativa antigua frente a 11 con la nueva.

6. Celosías y diafragmas transversales

En los arriostramientos transversales dispuestos para evitar la distorsión del cajón también se producen aumentos importantes con el empleo de la normativa actual. Por una parte, el efecto local del vehículo pesado situado sobre el propio elemento de arriostramiento supone ahora un incremento de entre un 10% y un 15% respecto la anterior normativa, como consecuencia de la mayor proximidad de los ejes del vehículo en sentido longitudinal: de tres ejes separados 1.5 m se ha pasado a sólo dos ejes separados 1.2 m. Además, la sobrecarga uniforme de tráfico de 9 kN/m^2 situada en el carril de borde genera un torsor 2.25 veces superior a la anterior sobrecarga de 4 kN/m^2 . El efecto conjunto del vehículo pesado más la sobrecarga para distancias entre celosías transversales del entorno de los 4 m, supone ahora un aumento aproximadamente del 25% en ELS y del 12% en ELU, menor en este caso

al aplicar el coeficiente de mayoración de 1.35 en lugar de 1.5, lo que se traduce en la disposición de perfiles más potentes de los que se venían colocando.

En los diafragmas transversales sobre apoyos, dependientes fundamentalmente de los cortantes que se transmiten a la subestructura, también sufren un aumento proporcional al del cortante en ELU, que como se vio en el apartado 3, superan en la mayoría de los casos el 20% de incremento.

7. Apoyos

Nuevamente se vuelven a sentir los incrementos de cortantes y torsos en el dimensionamiento de los apoyos. En general, las cargas sobre ellos, según lo visto previamente, serán ahora un 25% superiores a las que se obtenían con la norma antigua. Especial mención merece aquellos puentes con problemas de levantamiento en estribos, situación frecuente en aquellos puentes en los que la relación entre el vano lateral y el vano adyacente es baja. En esos casos, el mayor valor de los torsos en estribos obligará a disponer los apoyos con mayor separación transversal de lo que se venía empleando si se quieren evitar las reacciones de levantamiento, sin necesidad de disponer medios mecánicos que lo impidan.

8. Control de deformaciones

Según el artículo 7.1.1 de IAP-11, en puentes de carretera se debe verificar que la flecha vertical máxima debida a la sobrecarga frecuente no supere el valor $L/1000$, siendo L la luz del vano. Asimismo, se puntualiza que se permite superar ligeramente este valor si se realiza un control dinámico que permita asegurar que la amplificación de las deformaciones estáticas y las vibraciones generadas se mantiene en valores admisibles. Por su parte, el Eurocódigo EN 1990/A1 resulta mucho menos exigente

indicando en su artículo A2.4.2. que en puentes de carretera sólo será necesario controlar el estado límite de deformaciones en casos excepcionales. Pensamos que el criterio de IAP-11 debería tomarse exclusivamente como una recomendación, como de hecho así se contempla en la Instrucción de Acero Estructural, EAE [5]. De no ser así, pasaría a convertirse posiblemente en el estado límite más condicionante en el dimensionamiento de estos puentes, como puede comprobarse en las tablas 14 y 15. En ellas se muestra la flecha en la hipótesis frecuente en la serie de puentes estudiados y para la normativa antigua y la actual. Se comprueba como las flechas obtenidas con las cargas de Eurocódigo conducen a flechas entre 1.9 y 1.5 veces superiores a las que se obtenían con las antiguas cargas de IAP. Y es que como se ha visto, con las cargas actuales y para la anchura considerada de 7.3 m, se aplican dos vehículos pesados de 600 kN y 400 kN en lugar de exclusivamente el

de 600 kN, lo que supone un 66% más y una sobrecarga de 9 kN/m² en un carril y 2.5 kN/m² en el segundo frente a los 4 kN/m² en toda la anchura de la IAP-98, lo que resulta un 44% más.

En los puentes de canto constante se obtienen relaciones luz/flecha superiores a 1000 en todos los puentes calculados con IAP-98 y en los calculados con Eurocódigo de luz superior a 50 m. En los de luz inferior no se alcanza el límite, pero se obtiene valores cercanos.

Para los puentes de canto variable, más flexibles que los de canto constante, no se cumple esta relación en ningún caso, si bien, para aquellos calculados con IAP-98 los valores se aproximan situándose la relación luz/flecha entre 850 y 925. Para los calculados con Eurocódigo estos valores oscilan alrededor de 550, prácticamente la mitad de lo que resultaría admisible siguiendo estrictamente el criterio de IAP-11.

Tabla 14. Flechas en centro de vano (mm) en hipótesis frecuente. Puentes de canto constante

| Puentes | Norma | Flecha (mm) | Relacion Luz/f | Relación EN/IAP-98 |
|----------|-----------|-------------|----------------|--------------------|
| 24+30+24 | IAP-98 | 18.60 | 1612.90 | 1.91 |
| | EN/IAP-11 | 35.61 | 842.46 | |
| 32+40+32 | IAP-98 | 24.50 | 1632.65 | 1.82 |
| | EN/IAP-11 | 44.64 | 896.06 | |
| 40+50+40 | IAP-98 | 30.15 | 1658.37 | 1.57 |
| | EN/IAP-11 | 47.35 | 1056.08 | |
| 48+60+48 | IAP-98 | 36.90 | 1626.02 | 1.48 |
| | EN/IAP-11 | 54.44 | 1102.13 | |
| 56+70+56 | IAP-98 | 40.05 | 1747.82 | 1.54 |
| | EN/IAP-11 | 61.66 | 1135.35 | |

Tabla 15. Flechas en centro de vano (mm) en hipótesis frecuente. Puentes de canto variable

| Puentes | Norma | Flecha (mm) | Relacion Luz/f | Relación EN/IAP-98 |
|----------|-----------|-------------|----------------|--------------------|
| 24+30+24 | IAP-98 | 34.80 | 862.07 | 1.73 |
| | EN/IAP-11 | 60.26 | 497.84 | |
| 32+40+32 | IAP-98 | 46.40 | 862.07 | 1.65 |
| | EN/IAP-11 | 76.48 | 523.05 | |
| 40+50+40 | IAP-98 | 57.35 | 871.84 | 1.61 |
| | EN/IAP-11 | 92.49 | 540.60 | |
| 48+60+48 | IAP-98 | 70.15 | 855.31 | 1.43 |
| | EN/IAP-11 | 100.50 | 597.04 | |
| 56+70+56 | IAP-98 | 75.85 | 922.87 | 1.50 |
| | EN/IAP-11 | 113.90 | 614.60 | |

Posiblemente, la condición de superar el valor $L/1000$ definida en su momento en las recomendaciones para el proyecto de puente mixtos para carretera [6] de 1995, con objeto de asegurar un adecuado comportamiento dinámico, y ajustada para las sobrecargas de tráfico vigentes en ese momento, necesite una actualización acorde al cambio del valor de estas sobrecargas en la nueva normativa. De

9. Conclusiones

De la comparativa realizada se concluye que para los tableros estrechos de puentes mixtos con plataformas en el entorno de los 6 a 8 m, la aplicación de las nuevas normativas genera importantes incrementos de las solicitaciones respecto la IAP-98. La importancia de estos incrementos en el control de las chapas principales de la sección frente a tensiones normales y tangenciales, así como en el dimensionamiento del resto de elementos: celosías y diafragmas transversales, conexión, apoyos, etc. permiten asegurar que los puentes existentes en la actualidad con estas características dimensionados con la IAP-98, no verificarían los estados límites aplicando las normas actuales: IAP-11 y Eurocódigos, salvo que su diseño se hubiese realizado con un margen de seguridad superior en la mayoría de los casos al 20%..

otra forma, su estricto cumplimiento conllevaría un sobredimensionamiento de las secciones de los puentes de canto variable, aparentemente innecesario, al no existir una problemática detectada relativa a este estado límite de servicio en los puentes de esta tipología ya proyectados con la anterior normativa y en funcionamiento actualmente.

Referencias

- [1] Instrucción sobre las Acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera IAP-98, Ministerio de Fomento, Madrid, 1998.
- [2] Instrucción sobre las Acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera IAP-11, Ministerio de Fomento, Madrid, 2011.
- [3] Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Cargas de tráfico en puentes, 2004. UNE-EN 1991-2, AENOR.
- [4] Eurocódigos. Bases de cálculo en estructuras. 2010. UNE-EN 1990/A1. AENOR.
- [5] Instrucción de Acero Estructural, EAE-12, Ministerio de Fomento, Madrid, 2012.
- [6] Recomendaciones para el diseño de puentes mixtos para carretera, RPX-95, Ministerio de Fomento, Madrid, 1995.